

足利工業大学 学生員 井原啓介
 足利工業大学 正員 黒田充紀
 足利工業大学 正員 阿部英彦

1. はじめに

先の阪神大震災では鋼製橋脚のいくつかは、板厚変化部における局部座屈のみならず材料の破断を被った。塑性変形を伴う局部座屈挙動は、長年の研究成果の蓄積によりある程度の信頼性を持って数値解析的に解明されている。しかし、材料破断の予測は今後の大きな課題と思われる。本研究ではボイド損傷塑性論を用いて、局部座屈はもとより材料破断をも統一的に数値解析で予測することを試みた。具体的には、阪神高速神戸線の円筒鋼製橋脚(P-584 山側)をモデルとし、阪神・淡路大震災時に神戸海洋気象台において観測された加速度データを与えて非線形弾塑性動的応答解析を行う。この解析により板厚変化部の局部座屈による材料損傷の様子を調べた。

2. Gurson のボイド損傷理論

本解析では Gurson⁴⁾によって提案され Tvergaard⁶⁾によって修正された次式の降伏関数を用いる。

$$\Phi(\sigma, \sigma_m, f) = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_m^2} + 2q_1 f \cosh\left(\frac{q_2 \mathbf{I} : \boldsymbol{\sigma}}{2\sigma_m}\right) - 1 - q_3 f^2 = 0 \quad (1)$$

ここに $\boldsymbol{\sigma}$ はボイドを含む材料に作用するマクロな Cauchy 応力、 σ_m は母材の流れ応力、 $\mathbf{I}$ は単位テンソル、 $q_1 \sim q_3$ は Tvergaard⁶⁾によって導入された修正係数、 σ_e は $\boldsymbol{\sigma}$ による Mises 応力である。

3. 解析対象及び解析方法

解析対象として、阪神高速神戸線(P-584 山側)の橋脚を用いた。図-1 のように、基本的には、入力加速度方向を含む鉛直面を対称面とした 1/2 の三次元板構造としてモデル化する。局部座屈の発生が予想される板厚変化部である柱中間部のみ三次元固体構造とした。内側下部の中詰めコンクリート部は剛体と考え、それより上部のみをモデル化している。また頂部の桁重量として 422ton を付加質量として与えた。入力地震波は図-2 に示す神戸海洋気象台で観測された南北方向の加速度波形をモデル下端で与えた。また材料定数はヤング率 $E=206$ (GPa)、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、降伏応力 $\sigma_y=235$ (MPa) である。鋼材の応力-ひずみ関係は中川らの解析¹⁾を参考に、数値解析の便宜上いくつかの区間に分割した区分的線形式で定

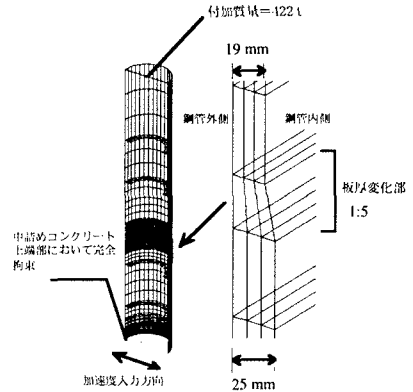


図-1 有限要素モデル (阪神高速神戸線 P-584 山側)

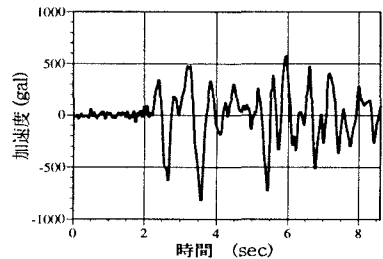


図-2 入力加速度

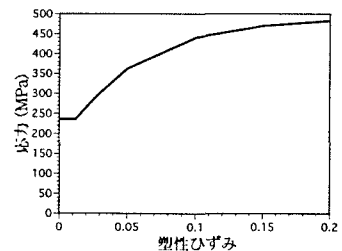


図-3 材料特性

義した(図-3)。解析には残留応力と初期不整の影響は考慮しなかった。

また Gurson モデルの材料パラメータとして多孔質材料パラメータ値 $q_1=1.5$, $q_2=1.0$, $q_3=2.25$ 、空孔発生パラメータ値 $\varepsilon_N=0.3$, $s_N=0.1$, $f_N=0.04$ を用いた。これらの値は文献 3), 5) を参考にした。使用要素は 4 節点厚肉シェ

ル素(S4R)及び8節点三次元固体要素(C3D8I),(ABAQUS Ver.5.6)を使用した.着目部である三次元固体要素を用いた部分のみに Gurson モデルを適用し,シェル要素を用いたその他の部分には,Mises 応力に基づくいわゆる J2 流れ理論を用いた.時間積分は,直接時間積分法により行い,時間増分量は主要動時には 0.0025 秒とした.時間積分の方法として,陰解法の一つである Hilber-Hughes-Taylor 法にを用いた.非線形の動的釣り合い式は Newton-Raphson 法で各時間増分で繰り返し計算により解いた.解析における減衰定数 h はゼロとした.

4. 解析結果

図-4 に開始から 3.5, 4.0, 7.0, 8.6 秒後の鋼製橋脚の変形状況を示す.(変形状態を 4 倍に拡大して表示した)地震波が 3.0 秒を過ぎてから,板厚が変化している直上部において局部座屈が発生している.

図-5 に付加質量の載荷点における水平方向変位の時刻歴を示す.図-2 の加速度波形における 2~4 秒間で最大値 220mm,5~7 秒間で 200mm の変位が発生している.これは各々の時間における大きな地震波によるものと考えられる.また最大応答加速度は 600gal となった.

図-6 にボイド体積分率(最大値)-時間の関係を示す.最大値は板厚変化部から約 100mm 上部の局部座屈が最も厳しい位置に発生している.ボイド体積分率の増加は応答変位の変動に対応しており,大きな波の後に急激に増加している.しかしこの時点では破断が予測されるほど増加は見られない.矩形断面の供試体に静的な強制変位(最大変位/柱高さ=0.031, 本解析の場合 0.017)をかけた解析の場合には,角部において破断に至るほどのボイド体積分率が発生していることが参考文献 7)により分かっている.

5. 結論

今回の解析では,鋼製円筒橋脚の局部座屈による母材の破断を定量的に予測するには至らなかったが,ボイド体積分率の段階的かつ急激な増加は,これと破断との何らかの関連性を示唆するものである.今後さらに,材料破壊挙動を忠実に再現できる構成式を開発・導入して行く必要があると思われる.

参考文献

- 1) 中川知和, 大谷修, 森脇清明: 阪神・淡路大震災で被災した鋼製円筒橋脚の非線形動的応答解析, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp-31-35, 1997.5
- 2) 中村秀治: 鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp-205-219, 1996.10
- 3) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc : ABAQUS/Standard Users Manual, Vol. I, II, Ver.5.4, Ver.5.6, 1997.

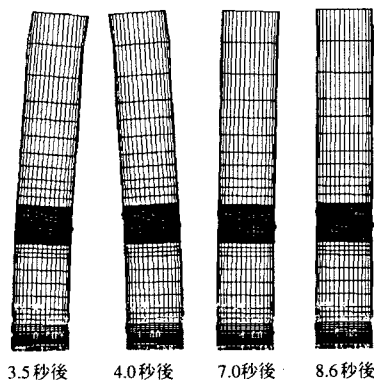


図-4 座屈形状

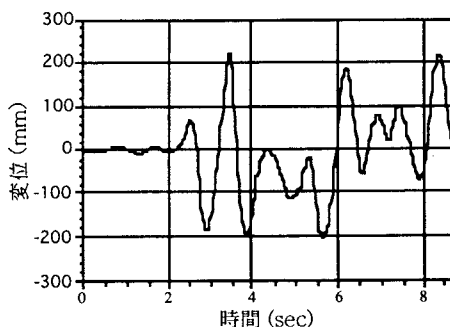


図-5 橋脚頂部の水平方向変位の時刻歴

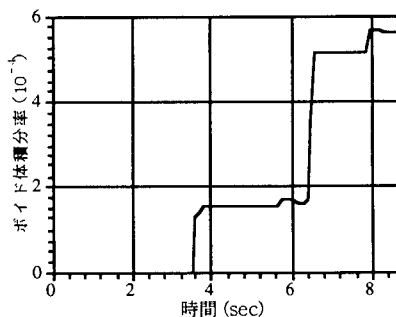


図-6 ボイド体積分率-時刻歴の関係

- 4) Gurson, A.L., Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth-I. yield criteria and flow rules for porous ductile media, ASME J.Engng Materials Technol. Vol. 99, pp. 2-15, 1977.
- 5) Tvergaard, V., Influence of void nucleation on ductile shear fracture at a free surface, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 30, pp.399-425, 1982.
- 6) Tvergaard, V., Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions, Int. J. Fracture, Vol. 17, pp.389-407, 1981.
- 7) 黒田充紀, 井原啓介, 阿部英彦: 矩形断面鋼製橋脚の大変形時における角部破壊予測の試み, 足利工業大学研究集録, 第 25 号, pp.207-214, 1997.9